

Комплексный метод контроля качества конструкции и эксплуатационной надежности термоэлектрических модулей в составе оптоэлектронных приборов

Г.Г. Громов¹, И.А. Драбкин², Л.Б. Ершова¹
¹ ЗАО «РМТ», Москва, Россия

² Институт Химических Проблем Микроэлектроники, Москва, Россия

Введение

Термоэлектрические (ТЭ) модули являются в настоящее время элементами многих оптоэлектронных приборов (фотодетекторы, матриц ПЗС, полупроводниковые лазеры и т.п.). В соответствии с международными и национальными стандартами к ТЭ модулям, применяющимся в оптоэлектронных приборах, предъявляются высокие требования по качеству и надежности.

Вместе с тем, в соответствии со стандартами испытаний на надежность (например, стандарты Telcordia, MIL) единственным критерием является сопротивление ТЭ модуля, величина изменения которого призвана свидетельствовать о надежности изделия. Дополнительно компании-производители термоэлектрических модулей проводят в процессе производства и выходного контроля измерения термоэлектрической добротности ТЭ модуля – так называемый параметр Z .

В нашей предыдущей работе [1] было показано, что такой подход является недостаточным для детального контроля качества ТЭ модуля: оказывается невозможным подробный анализ причин некачественной продукции, а в ряде случаев по данным параметрам не удается выявить и сам дефект. Был предложен метод комплексного анализа качества и надежности ТЭ модуля путем контроля трех его параметров: сопротивления ($AC R$), добротности (Z) и постоянной времени (τ). Применимость данного метода была рассмотрена [1] на примере анализа технологического брака на стадии производства и надежность испытаний ТЭ модулей.

В настоящей работе будет рассмотрена применимость метода комплексного контроля (Z , R , τ) для оценки качества и надежности ТЭ модулей, интегрированных в оптоэлектронные устройства, тем более, когда демонтаж и отдельный анализ ТЭ модуля не возможен и не желателен.

Использование такого подхода оказывается возможным с помощью единственного в настоящее время семейства серийных приборов Z, R, τ -метров серии DX4065 и DX4165, разработанных в компании РМТ.

Методы исследования

В настоящей работе будут приведены результаты как экспериментальных, так и теоретических исследований. Экспериментальные измерения проводились с использованием Z, R, τ -метра серии DX4065. В качестве примеров использовались оптоэлектронные конструкции на основе стандартных оптоэлектронных корпусов (типа ТО) и стандартных ТЭ модулей производства компании РМТ, оптимальных для данных конструкций.

Результаты

Рассмотрим конструкцию оптоэлектронного устройства с использованием встроенного ТЭ модуля (рисунок 1).

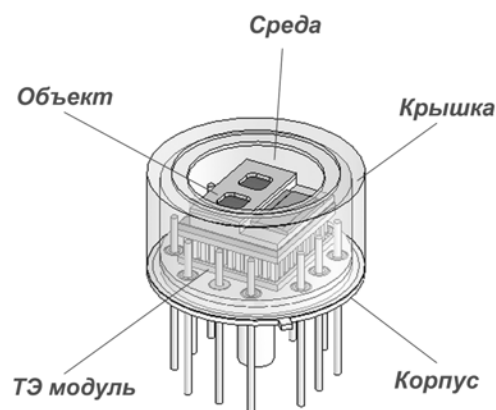


Рисунок 1. Пример конструкции оптоэлектронного устройства с использованием встроенного ТЭ модуля

В общем случае такое устройство представляет собой стандартный или специальный корпус, внутри которого смонтирован ТЭ модуль, на холодной стороне которого помещен объект охлаждения. Внутри оптоэлектронного прибора обеспечивается контролируемая среда (вакуум, газ). Термоэлектрический охладитель призван обеспечить отвод тепла от охлаждаемого объекта, его охлаждение ниже температуры окружающей среды и термостабилизацию при заданной температуре.

Учитывая то, что функционирование оптоэлектронного прибора в целом зависит от качества обеспечения отмеченных условий, то очевидны требования к надежности и качеству ТЭ модуля в составе оптоэлектронного изделия. Очевидно, они зависят как от качества и надежности самого ТЭ модуля, так и всей охлаждающей конструкции.

В связи с этим анализ надежности можно разбить на отдельные наиболее значимые элементы:

- эксплуатационная надежность ТЭ модуля. Закономерно, что в процессе эксплуатации имеет место постепенная деградация ТЭ модуля. Оценки надежности проводятся в соответствии со стандартами по результатам ускоренных испытаний, имитирующих различные воздействующие факторы эксплуатации (механические, температурные и т.п.)

- монтаж ТЭ модуля в корпусе прибора. Метод монтажа и его качество заметно сказывается в процессе эксплуатации.

- монтаж охлаждаемого объекта на ТЭ модуль. Это также является предметом детального анализа, так как надежность и эффективность расположения объекта охлаждения на ТЭ модуль определяет эффективность функционирования оптоэлектронного изделия в целом.

- Контролируемая среда в охлаждающей системе. Контролируемая среда в объеме охлаждения призвана минимизировать тепловые потери (идеально - вакуум) или обеспечить контролируемые и стабильные условия эксплуатации. Соответственно изменения и нарушения данной среды сказывается на эффективности термоэлектрической охлаждающей конструкции.

Эксплуатационная надежность ТЭ модуля

Методы ускоренных испытаний призваны проверить надежность ТЭ модуля в оптоэлектронных применениях.

На рисунках 2 и 3 приведены результаты надежностных испытаний стандартных ТЭ модулей компании РМТ. Методы испытаний – температурные (термоудар) (рисунок 2) и ускоренные испытания на наработку на отказ при повышенной температуре (рисунок 3).

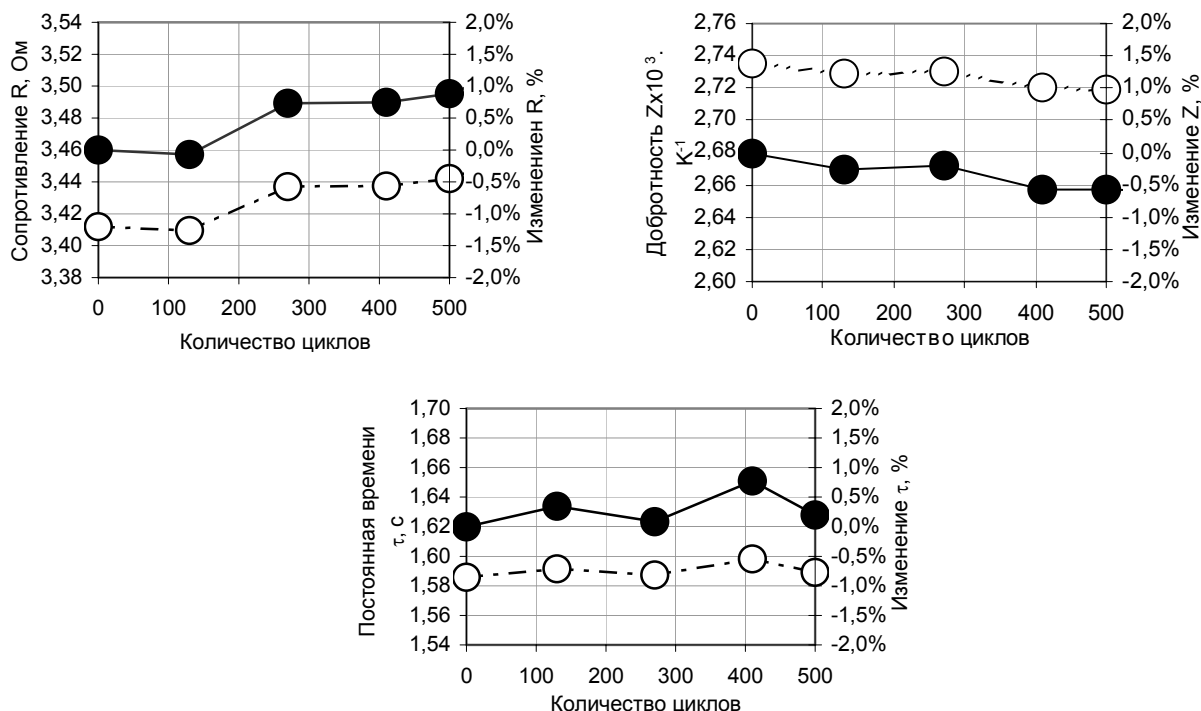


Рисунок 2. Изменение параметров ТЭ модуля 1МС06-060-10 (R и Z) в процессе температурных испытаний: 500 циклов термоудара от -50 до $+125$ °С

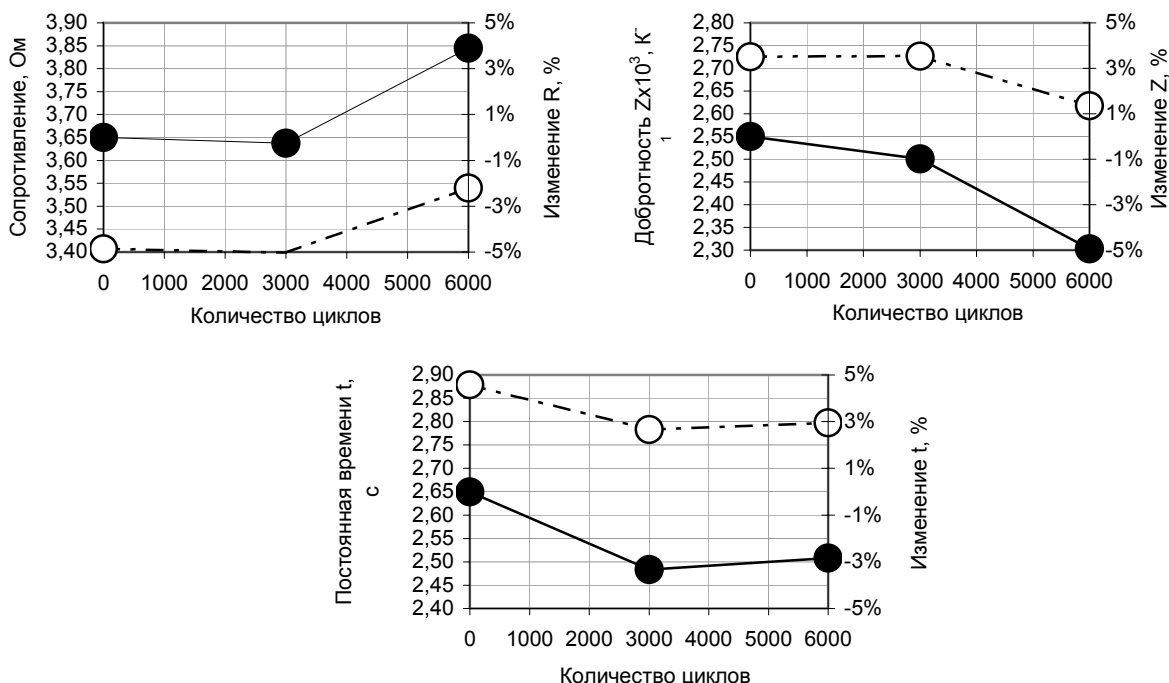


Рисунок 3. Изменение параметров ТЭ модуля 1МС06-060-10 (Z, R и τ) в процессе испытаний на наработку на отказ: 6000 циклов «включено - выключено» (5 мин/5 мин) при повышенной температуре 85 °С

Как уже отмечалось в работе [1], воздействующие факторы должны вести к деградации ТЭ модуля, и, в частности, ТЭ материала конструкции охладителя. Причем при известных механизмах деградации тенденции в изменении измеряемых параметров одинаковы – происходит увеличение сопротивления модуля и уменьшение добротности на фоне незначительных изменений постоянной времени ТЭ модуля в составе конструкции.

В частности, такой метод, как температурные испытания (термоудар), прежде всего, должен приводить к механической деградации ТЭ модуля, а именно, появлению микротрещин в материале модуля. Это в свою очередь должно проявляться в увеличении электрического сопротивления модуля R и соответствующем уменьшении его добротности Z , так как имеется обратно пропорциональная зависимость ТЭ добротности от сопротивления модуля. В упрощенном виде это можно записать как:

$$Z \sim \frac{\alpha^2}{k_0} \frac{1}{R_0}, \quad (1)$$

где α – коэффициент Зеебека ТЭ материала, k_0 – теплопроводность ветви, R_0 – электрическое сопротивление ветви.

В случае ускоренных испытаний на наработку на отказ при повышенной температуре, механизмы деградации, по-видимому, более сложны (одновременное воздействие температуры, тока и тепловых напряжений), но результат похожий – увеличение сопротивления R и уменьшение добротности Z .

Постоянная времени охладителя оказывается более инертной, чем Z и R , к такому виду воздействия, как надежность испытания, однако ее поведение не менее познавательно. Поведение постоянной времени τ – показатель тенденции изменения теплопроводности k ТЭ модуля:

$$\tau \sim \frac{C}{k}, \quad (2)$$

где C – теплоемкость всех объектов, соединенных с холодными концами ТЭ ветвей.

При температурных испытаниях, приводящих к объемным деформациям в материале ТЭ модуля, его теплопроводность несколько уменьшается, отсюда незначительное возрастание его константы времени, что и наблюдается в эксперименте (см. рисунок 2).

При наработке на отказ при повышенной температуре включаются диффузионные механизмы приконтактных слоев теплопереходов, отсюда такое, на первый взгляд, парадоксальное уменьшение константы времени охладителя (см. рисунок 3).

Монтаж ТЭ модуля на корпус прибора

Качество монтажа ТЭ модуля на основании корпуса оптоэлектронного прибора призвано, кроме механической интеграции, обеспечить надежный теплосток с основания охладителя. Как при монтаже охладителя, так и в процессе эксплуатации целостность теплового контакта ТЭ модуля с основанием прибора может нарушаться или ухудшаться. Например, в случае пайки, как метода монтажа, в процессе сборки на корпус возможны локальные непропаи. А в процессе эксплуатации возможна коррозия или нарушение паяного соединения с уменьшением площади теплового контакта.

Очевидно, что качество монтажа ТЭ модуля на основание корпуса оставляет R неизменным.

Будем моделировать ухудшение качества контакта ТЭ модуля с основанием как уменьшение площади этого контакта. Механизмы воздействия изменения площади контакта на величины Z и τ различны.

Для добротности модуля этот параметр существенен как характеристика коэффициента теплоотдачи с поверхности контакта. При определении Z однокаскадного ТЭ модуля с помощью метода Хармана [2,3], запишем ТЭ добротность как:

$$Z = \frac{\Delta T}{T_{av}} \frac{N\alpha}{IR}, \quad (3)$$

где N – число ветвей в ТЭ модуле.

Если A – полный коэффициент теплоотдачи с поверхности контакта ТЭ модуль-основание, то от величины A в формуле (3) зависит как средняя температура ТЭ модуля T_{av} , так и разность температур ΔT на модуле. При нарушении теплоотвода с горячей стороны модуля, последний начинает перегреваться. В приближении малой теплоотдачи по воздуху, выразим обе величины T_{av} и ΔT через A [4,5]:

$$\Delta T(A) = \frac{\alpha I}{k_0} \left(T_a + \frac{I^2 N R_0}{A} \right) - \frac{I^2 R_0}{2k_0 A} \quad (4a)$$

$$T_{av}(A) = T_a \left(1 + \frac{\alpha I}{2k_0} \right) + \frac{I^2 R_0 N}{A} \left(1 + \frac{A}{4Nk_0} \right) \quad (4б)$$

Как видим, обе величины возрастают с уменьшением A , однако ΔT возрастает быстрее, так как температура горячей стороны опережает в росте температуру холодной. Отсюда величина ТЭ добротности Z должна обнаруживать рост при ухудшении теплового контакта с корпусом – рисунок 4.

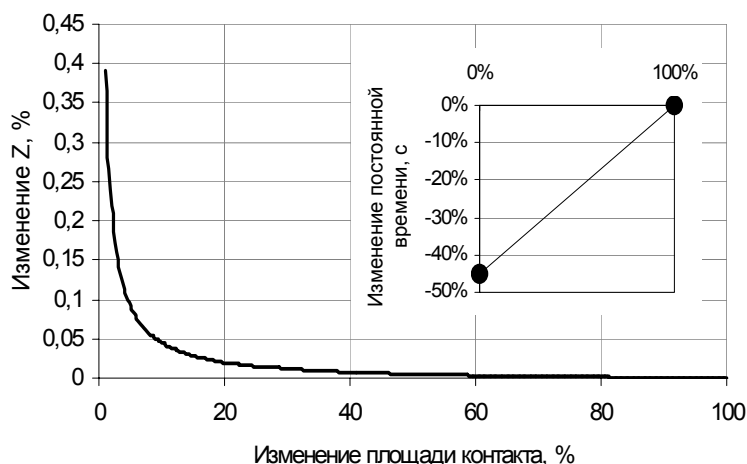


Рисунок 4. Расчетная оценка зависимости Z и τ однокаскадного ТЭ модуля от площади контакта с основанием оптоэлектронного прибора

В эксперименте, действительно, наблюдается повышение Z (рисунок 5), что согласуется с теоретическими оценками.

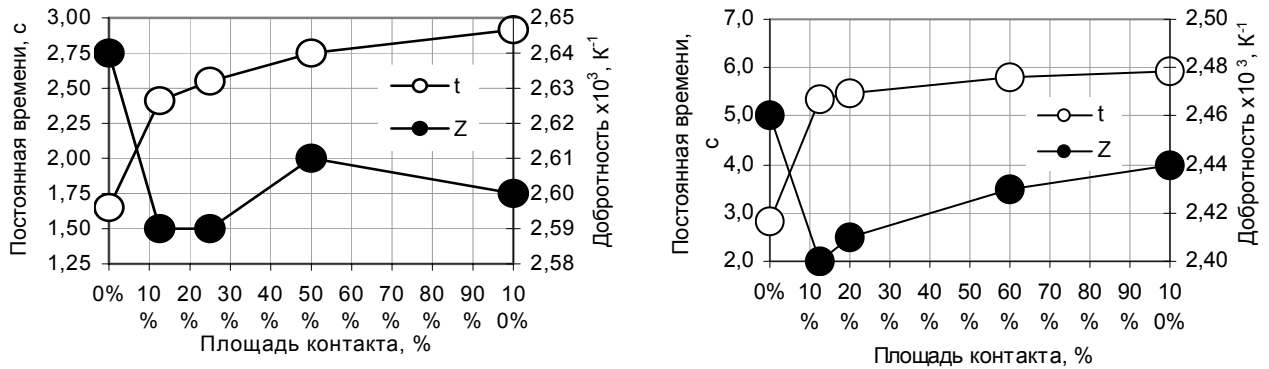


Рисунок 5. Измеренная зависимость параметров ТЭ модуля от площади контакта с основанием оптоэлектронного прибора: а) ТЭ модуль типа 1MC06-060-10; б) ТЭ модуль типа 2MC06-041-15

Для постоянной времени модуля существенна теплоемкость объектов, контактирующих с модулем.

Константа времени однокаскадного ТЭ модуля с качественным тепловым контактом горячей стороны и основания корпуса может быть оценена как:

$$\tau_1 = \frac{LC_1}{s_0\kappa_0 N}, \quad (5)$$

где C_1 – теплоемкость коммутационных шин и теплоперехода ТЭ модуля на охлаждаемой стороне; N – количество ветвей в модуле, s_0 – площадь поперечного сечения ветви.

Для однокаскадного ТЭ модуля, холодный и горячий теплопереходы которого находятся в постоянном теплообмене с окружающей средой (для свободного модуля), константа времени может быть представлена как:

$$\tau_2 = \frac{C_1 C_2 L}{(C_1 + C_2)\kappa_0 N s_0}, \quad (6)$$

где C_1, C_2 – теплоемкости всех элементов на холодном и горячем теплопереходах соответственно.

Если $C_1 \approx C_2$, что очень близко к реальности для свободного модуля, получаем, что постоянная времени для однокаскадного модуля, полностью утратившего контакт с корпусом примерно в два раза меньше, чем для модуля, качественно установленного на корпус:

$$\tau_2 \cong \frac{1}{2}\tau_1 \quad (7)$$

Изменение постоянной времени τ носит ступенчатый характер, исходя из критерия «есть контакт – нет контакта» с теплоемкостью корпуса. Это подтверждается экспериментальными данными – см. рисунок 5: для однокаскадного ТЭ модуля 1MC06-060-10 константа времени, действительно, уменьшается на 81.2%. Для двухкаскадного ТЭ модуля это падение выражено несколько меньше.

Видно, что как в случае однокаскадного ТЭ модуля, так и в случае двухкаскадного имеет место возрастание Z , но оно относительно мало и не столь показательно. Именно постоянная времени конструкции – характерный показатель надежности контакта ТЭ модуля и корпуса.

Монтаж объекта охлаждения на теплопоглощающую поверхность ТЭ модуля

Аналогично предыдущему разделу, качество и надежность монтажа объекта охлаждения на холодную сторону ТЭ модуля также существенно влияют на постоянную времени модуля в составе конструкции.

Как видно из выражений (2) и (5), постоянная времени прямо пропорциональна теплоемкости, а значит массе охлаждаемого объекта. На рисунке 6 даны теоретические кривые зависимости констант времени различных ТЭ модулей от массы охлаждаемого объекта.

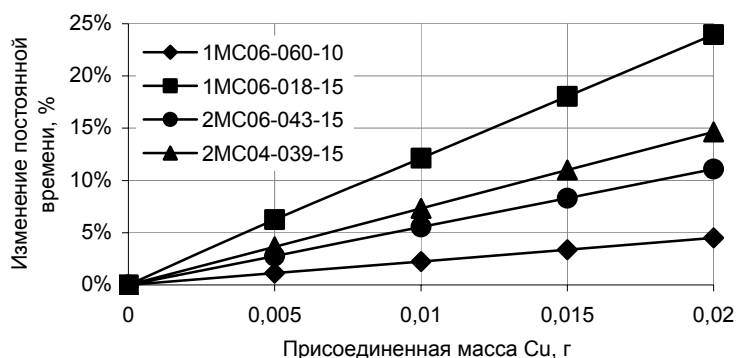


Рисунок 6. Расчетная оценка зависимости изменения постоянной времени ТЭ модуля от массы охлаждаемого объекта

Экспериментальные данные подтверждают, что постоянная времени ТЭ модуля имеет сильную зависимость от прикрепленной к холодной стороне массе (Рис. 7).

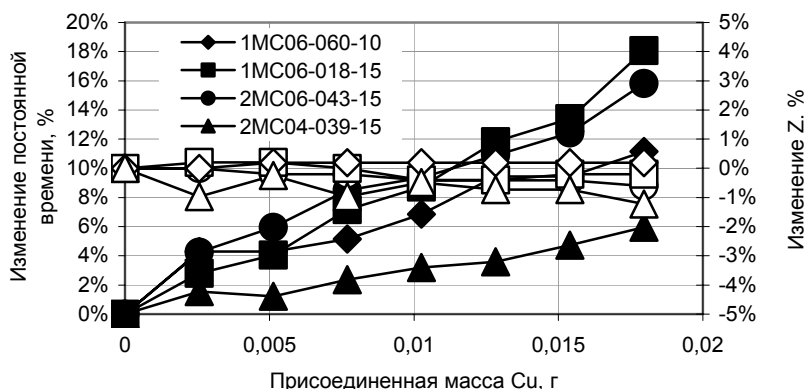


Рисунок 7. Зависимость параметров ТЭ модуля от присоединенной к холодной стороне эквивалентной массы меди для нескольких типов ТЭ модуля: заполненные значки – τ , левая шкала; полые значки - Z , правая шкала

В связи с этим существенные изменения постоянной времени ТЭ модуля в процессе эксплуатации в составе конструкции без видимых изменений добротности и сопротивления могут однозначно свидетельствовать о потере контакта с охлаждаемым объектом (обрыв, отпаивание, разрушение и т.п.)

Среда системы охлаждения

В случае создания специальной среды в системе охлаждения ее качество и постоянство в процессе эксплуатации также требуется контролировать. Измерение параметров ТЭ модуля в составе оптоэлектронного прибора позволяет осуществлять этот контроль.

- вакуумная среда

Как известно, вакуум в системе охлаждающей ТЭ конструкции является наилучшим случаем для уменьшения паразитных тепловых потерь, так как практически исключает дополнительную теплопроводность и конвекцию, увеличивающую теплоотдачу с холодной стороны.

При нарушении вакуумной плотности конструкции прибора будет наблюдаться заметное уменьшение эффективного охлаждения. Измерения дадут заметное изменение величины добротности, однако сопротивление ТЭ модуля будет практически неизменно. Слабое влияние теплопроводности оказывает влияние и на постоянную времени, которая незначительно падает.

- газонаполненная среда

В случае нарушения газонаполнения в охлаждаемом объеме появляется неконтролируемая среда (на практике, скорее всего окружающий воздух). Это должно приводить к измерению добротности конструкции, однако заметно меньше, чем для случая с вакуумом. Однако более заметно будет то, что окружающий воздух имеет достаточную влажность. И при работе охлаждающей конструкции в условиях влажной среды будет иметь место конденсация влаги на холодной стороне. Это однозначно приведет к уменьшению добротности конструкции.

Оценим расчетным путем чувствительность величин Z и τ однокаскадного ТЭ модуля к нарушению вакуума, то есть возрастанию влияния двух процессов:

а) теплопроводности в зазорах между ветвями ТЭ модуля (сказывается как в значении Z , так и в значении τ);

б) теплоотдачи с поверхности ТЭ модуля (сказывается в значении Z)

Пусть в вакуумную конструкцию проник воздух. Рассмотрим, что при этом происходит с величиной ТЭ добротности ТЭ модуля в составе прибора. На воздухе, кроме излучательного, проявляются теплопроводный и конвекционный механизмы теплопередачи. Учтем дополнительную теплопроводность по воздуху в зазорах между ветвями как увеличенную теплопроводность каждой ветви ТЭ модуля:

$$k'_0 = k_0 \left(1 + \frac{\kappa_{air}}{\kappa_{mater}} \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \right), \quad (8)$$

где k_0 – теплопроводность ТЭ ветви, κ_{air} – теплопроводность воздуха, κ – теплопроводность термоэлектрического материала, β - коэффициент заполнения модуля, представляющий отношение площади поперечного сечения всех ветвей в модуле к площади теплоперехода модуля.

Если теплопроводность ТЭ ветви составляет $k_0 = 1.45$ Вт/мК, то для 1МС06-060 и 1МС06-018 (коэффициенты заполнения $\beta=0.36$) при 293К теплопроводность $k'_0 = 1.49$ Вт/мК.

В таблице 1 приведены результаты расчетов для коэффициентов излучательной и конвекционной теплоотдачи на единицу поверхности для 1МС06-060-xx и 1МС06-018-xx при измерениях по методу Хармана.

Таблица 1 – расчетные оценки излучательного и конвекционного коэффициентов теплоотдачи ТЭ модулей при измерениях по методу Хармана. Температура окружающей среды принята 293К. Характерная разность температур 3К. Учтена возможность снижения радиационной нагрузки с помощью экранов.

Тип ТЭ модуля	$\alpha_{рад}$, Вт/м ² К	$\alpha_{конв}$, Вт/м ² К	$\alpha_{сум}$, Вт/м ² К
1МС06-060	1.61	8.17	9.78
1МС06-018	2.93	9.29	12.22

На рис. 8а приведены примеры теоретических расчетов (см. формулы (3), (4)), подтверждающие уменьшение ТЭ добротности конструкции при нарушении контролируемой среды системы охлаждения.

Для константы времени ТЭ модуля существенной оказывается лишь эффективное увеличение теплопроводности ТЭ ветвей. С учетом выражений (5), (8) получаем уменьшение константы времени ТЭ модуля в воздушной среде – см. рисунок 8б.

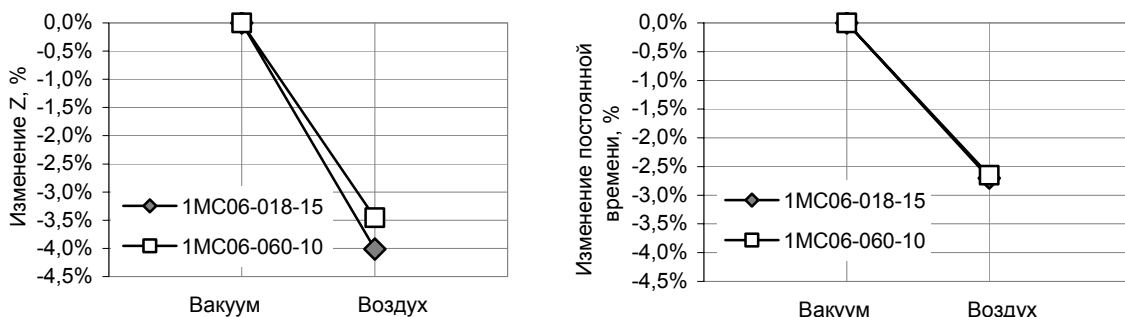


Рисунок 8. Расчетная оценка изменения а) ТЭ добротности Z и б) постоянной времени τ ТЭ модуля в зависимости от среды охлаждения

Заключение

В таблице 3 воспроизведена диагностическая матрица из нашей предыдущей работы [1], с помощью которой по измерению трех предложенных параметров (Z , R , τ) можно диагностировать причины ухудшения качества ТЭ модуля.

В таблице 4 приведено продолжение данной диагностической матрицы для комплекса случаев ТЭ модуля интегрированного в составе оптоэлектронного прибора.

Таблица 3. Диагностическая матрица дефектов ТЭ модулей [1]

Дефект	R	Z	τ
1. Отслоение коммутационных пластин от керамики	\sim const	\sim const	\uparrow
2. Перепутанная полярность ветвей ТЭ модуля	\sim const	\downarrow	\uparrow^*
3а Тепловой контакт ветвей ТЭ модуля с припойным мениском	\sim const	\downarrow	\downarrow
3б. Тепловой и электрический контакт ветвей ТЭ модулей с припойным мениском	\downarrow	\sim const	\downarrow
4. Короткое замыкание ветвей ТЭ модуля	\downarrow	\downarrow	\downarrow
5. Двухкаскадный ТЭ модуль: перепутанная полярность одного из каскадов	\sim const	\sim const	\downarrow^{**}
6. Дегградация ТЭ материала модуля	\uparrow	\downarrow	\sim const
*- \sim const при малом токе; **- \sim в два раза меньше номинального значения			

Таблица 4. Диагностическая матрица дефектов ТЭ модуля, интегрированного в оптоэлектронный прибор

Дефект	R	Z	τ
1) Дегградация ТЭ модуля в процессе эксплуатации	\uparrow	\downarrow	\uparrow или \downarrow
2) Дефекты монтажа ТЭ модуля в корпусе прибора	\sim const	\uparrow	\downarrow^*
3) Дефекты монтажа объекта охлаждения на ТЭ модуль	\sim const	\sim const	\downarrow
4) Нарушение среды охлаждения	\sim const	\downarrow	\downarrow
*- при полном отрыве от корпуса \sim в два раза меньше номинального значения			

Из таблицы 4 видно, что применение метода анализа по трем критериям позволяет проводить выявление причин, вызывающих ухудшения качества и надежности термоэлектрических охлаждающих конструкций в составе оптоэлектронных приборов. При этом, установление причин возможно без демонтажа ТЭ модуля из оптоэлектронного прибора.

По одному же из рассмотренных параметров, например, как принято, по R , в трех из четырех рассмотренных случаев невозможно не только идентифицировать причины происходящего, но и вообще установить факт ухудшения качества охлаждающей конструкции, а также ее ответственности за ухудшение эксплуатационных качеств оптоэлектронного прибора. И наоборот (что также важно), если причины выхода из строя оптоэлектронного прибора не связаны с ТЭ модулем, то метод позволяет подтвердить это достаточно точно, если все измеренные параметры находятся в пределах допустимых значений.

Литература

1. L.B. Yershova, G.G. Gromov, I.A. Drabkin. Complex Express TEC Testing. Proc. of XXII Int. Conf. on Thermoelectrics, August 17-21, La Grande Motte, France, 2003. P. 504
2. Harman T.C. Measurement of Pertinent thermoelectric Properties. //Thermoelectric Materials and Devices. Cadoff I.B., Miller E., Reinhold, 1967, chap.6.
3. V.P.Babin, S.M.Gorodetskiy. Thermoelectric modules quality testing by a manufacturer. Proc. XIV Int. Conf. on Thermoelectrics, June 27-30, St. Petersburg, Russia, 1995. P. 338.
4. И.А. Драбкин. Характеристики термоэлектрических модулей. Термоэлектрическое охлаждение. /Под ред. Л.П. Булата. – СПб: СПбГУНиПТ, 2002, С. 99.
5. G.Gromov, D.Kondratiev, A.Rogov, Yershova L. Z-Meter: Easy-to-use Application and Theory. Proc. of VI European Workshop on Thermoelectrics, Freiburg, 2001.

Complex Method to Control the Quality of Construction and Performance Reliability of Thermoelectric Modules in Optoelectronic Devices

L.B. Yershova¹, G.G. Gromov¹, I.A. Drabkin²

¹RMT Ltd, Moscow, Russia

² Institute of Chemical Problems for Microelectronics, Moscow, Russia

International and national standards require high reliability from thermoelectric (TE) modules applied in optoelectronic devices. A standard criterion is the measurement and specification of the module electric resistance (R). At the manufacturing stage the module TE figure-of-merit (Z) is also controlled by the Harman method. Paper [1] suggested a complex quality control method by measuring TE module R , Z and time constant (τ). As a follow-up of this approach the given paper shows the advantages of the complex (R , Z , τ)-measurement for estimating the quality of assemblies based on TE modules as well as modules reliability control or failure while operating in optoelectronic devices. Theoretical backgrounds and experimental results are offered. The measurements were carried out with the help of Z, R, τ -meters of the DX4065 and DX4165 series produced by RMT Ltd.